

Rec'd PCT/PTO 10 JUN 2005
PCT/IB 03 / 05902 #2
(10.12.03)



Europäisches
Patentamt

European
Patent Office

Office européen
des brevets

REC'D 31 DEC 2003

WIPO

PCT

Bescheinigung

Certificate

Attestation

Die angehefteten Unterla-
gen stimmen mit der
ursprünglich eingereichten
Fassung der auf dem näch-
sten Blatt bezeichneten
europäischen Patentanmel-
dung überein.

The attached documents
are exact copies of the
European patent application
described on the following
page, as originally filed.

Les documents fixés à
cette attestation sont
conformes à la version
initialement déposée de
la demande de brevet
européen, spécifiée à la
page suivante.

Patentanmeldung Nr. Patent application No. Demande de brevet n°

02102809.7

PRIORITY DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) OR (b)

Der Präsident des Europäischen Patentamts;
Im Auftrag

For the President of the European Patent Office

Le Président de l'Office européen des brevets
p.o.

R C van Dijk

BEST AVAILABLE COPY

Anmeldung Nr:
Application no.: 02102809.7
Demande no:

Anmeldetag:
Date of filing: 18.12.02
Date de dépôt:

Anmelder/Applicant(s)/Demandeur(s):

Philips Intellectual Property & Standards
Steindamm 94
D-20099 Hamburg
Germany

Koninklijke Philips Electronics N.V.
Groenewoudseweg 1
NL-5621 BA Eindhoven
Netherlands

Bezeichnung der Erfindung/Title of the invention/Titre de l'invention:
(Falls die Bezeichnung der Erfindung nicht angegeben ist, siehe Beschreibung.
If no title is shown please refer to the description.
Si aucun titre n'est indiqué se référer à la description.)

Verfahren und Verarbeitung eines Eingangsbildes durch Multiskalenzerlegung

In Anspruch genommene Priorität(en) / Priority(ies) claimed / Priorité(s)
revendiquée(s)
Staat/Tag/Aktenzeichen/State/Date/File no./Pays/Date/Numéro de dépôt:

Internationale Patentklassifikation/International Patent Classification/
Classification internationale des brevets:

G06T5/30

Am Anmeldetag benannte Vertragstaaten/Contracting states designated at date of
filing/Etats contractants désignées lors du dépôt:

AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR IE IT LI LU MC NL
PT SE SI SK TR

BESCHREIBUNG

Verfahren zur Verarbeitung eines Eingangsbildes durch Multiskalenzerlegung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Datenverarbeitungseinheit zur Verarbeitung eines Eingangsbildes, insbesondere zur Multiskalenzerlegung und
5 gradientenadaptiven Filterung eines Röntgenbildes in Echtzeit.

Die automatisierte Auswertung von Bildern findet in vielen verschiedenen Anwendungsgebieten statt. Die nachfolgend näher betrachtete Verarbeitung fluoro-
skopischer Röntgenbilder ist daher nur als Beispiel zu verstehen. Um die Belastung
10 eines Patienten und des Personals mit Röntgenstrahlung zu minimieren, werden Röntgenbilder mit einer möglichst geringen Strahlendosis aufgenommen. Dabei besteht jedoch das Risiko, dass wichtige Bilddetails im Bildrauschen verloren gehen. Um dies zu verhindern, wird durch Anwendung räumlicher und zeitlicher Filter auf die Röntgen-
bilder beziehungsweise -bildsequenzen versucht, das Rauschen zu unterdrücken, ohne
15 dabei relevante Bildinformationen zu vernichten.

Im Rahmen einer derartigen Bildverarbeitung wird häufig eine sogenannte Multiskalen-
zerlegung des Eingangsbildes vorgenommen. Das Eingangsbild wird dabei in eine Folge von Detailbildern zerlegt, wobei die Detailbilder jeweils Bildinformation aus
20 einem zugehörigen Bereich bzw. Band an (Orts-)Frequenzen enthalten. Zudem sind die Detailbilder in ihrer Auflösung, d.h. der Anzahl von Bildpunkten für die Darstellung des Bildgehaltes, an ihren jeweiligen Frequenzbereich angepasst. Durch die Modifikation von Detailbildern ist es möglich, gezielt auf bestimmte Frequenzbereiche Einfluss zu nehmen. Nach der Modifikation können die Detailbilder wieder zu einem
25 Ausgangsbild zusammengesetzt werden.

Aus der WO 98/55916 A1 sowie der EP 996 090 A2 ist diesbezüglich ein leistungsfähiges Verfahren zur Nachbearbeitung von Röntgenbildern bekannt, bei welchem eine Multiskalenzerlegung stattfindet und die dabei erhaltenen Detailbilder mit Filtern
30 modifiziert werden, deren Koeffizienten basierend auf Bildgradienten adaptiert wurden.

Die Gradienten stammen jeweils aus den gröberen Auflösungsstufen der Multiskalenzerlegung. Bei diesem als MRGAF (Multi-Resolution Gradient Adaptive Filtering) bezeichneten Verfahren wird senkrecht zu Bildstrukturen wie Linien oder Kanten weniger stark tiefpassgefiltert als in Richtung der Strukturen, so dass eine informations-
5 erhaltende Rauschunterdrückung stattfindet. Aufgrund des großen Rechenaufwandes kann das Verfahren jedoch bisher nur offline an gespeicherten Bildern oder Bildsequenzen ausgeführt werden.

Vor diesem Hintergrund war es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, Mittel zur
10 effizienteren Verarbeitung von Eingangsbildern mit einer Multiskalenzerlegung bereitzustellen, wobei vorzugsweise eine Bildanalyse in Echtzeit möglich werden soll.

Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1, durch eine Datenverarbeitungseinheit mit den Merkmalen des Anspruchs 8 sowie durch ein
15 Röntgensystem mit den Merkmalen des Anspruchs 10 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen sind in den Unteransprüchen enthalten.

Das erfindungsgemäße Verfahren dient der Verarbeitung eines aus N Zeilen von Bildpunkten bestehenden Eingangsbildes. Typischerweise sind die Bildpunkte in einem
20 rechteckigen Gitter mit zu den Zeilen senkrechten Spalten angeordnet, wenngleich auch andere Anordnungen mit Zeilenstruktur wie z.B. hexagonale Gitter möglich sind. Das Eingangsbild kann insbesondere ein digitalisiertes fluoroskopisches Röntgenbild sein, wobei das Verfahren jedoch nicht hierauf beschränkt ist und in allen vergleichbaren Anwendungsfällen, bei denen eine Multiskalenzerlegung eines Bildes stattfindet, mit
25 Vorteil einsetzbar ist. Das Verfahren umfasst die folgenden Schritte:

- a) Ein Bildstreifen, welcher aus $n < N$ benachbarten Zeilen des Eingangsbildes besteht, wird in eine Folge von K Detailbildern zerlegt, wobei die Detailbilder jeweils nur einen Teilbereich der Ortsfrequenzen des Bildstreifens enthalten. Mit
30 dem streifenförmigen Ausschnitt des gesamten Eingangsbildes wird somit eine Multiskalenzerlegung durchgeführt.

- b) Mindestens eines der in Schritt a) erhaltenen Detailbilder wird modifiziert, zum Beispiel durch Anwendung eines vorgegebenen oder aus dem Bildstreifen berechneten Filters. Vorzugsweise stehen dabei alle für die Modifikation benötigten Informationen in dem Bildstreifen zur Verfügung.
- c) Aus den Detailbildern bzw. den modifizierten Detailbildern (soweit diese existieren) wird ein Ausgangsbildstreifen rekonstruiert.
- d) Die vorstehenden Schritte a), b) und c) werden für andere Bildstreifen des Eingangsbildes wiederholt, das heißt in analoger Weise unter Berechnung eines entsprechenden Ausgangsbildstreifens durchgeführt. Dabei können gegebenenfalls auch andere Werte für die Streifenbreite n und/oder der Zerlegungstiefe K angenommen werden.
- e) Aus den berechneten Ausgangsbildstreifen wird ein Ausgangsbild rekonstruiert.

Im Ergebnis wird bei obigem Verfahren somit aus einem Eingangsbild ein Ausgangsbild (gleicher Größe oder einer anderen Größe) erzeugt, wobei in einigen oder allen Ortsfrequenzbereichen des Eingangsbildes Modifikationen gewünschter Art vorgenommen wurden. Gegenüber einer herkömmlichen Multiskalenzerlegung mit einer Modifikation von Detailbildern besteht der Unterschied des Verfahrens darin, dass die Multiskalenzerlegung abschnittsweise an Bildstreifen aus jeweils n Zeilen erfolgt. Jeder Bildstreifen wird dabei bis zur Stufe K zerlegt und anschließend wieder zu einem Ausgangsbildstreifen synthetisiert. Der Vorteil dieses Vorgehens liegt darin, dass es sich besonders für eine effiziente Implementation auf einer Datenverarbeitungsanlage eignet, da der Speicherbedarf für die Verarbeitung eines Bildstreifens entsprechend geringer ist als für die Verarbeitung des kompletten Bildes, so dass das Verfahren unter Verwendung eines Arbeitsspeichers mit schnellem Zugriff ausgeführt werden kann. Hierdurch kann ein so großer Geschwindigkeitsgewinn erzielt werden, dass in vielen Fällen erstmals die Ausführung der Multiskalenzerlegung in Echtzeit praktikabel wird.

- Gemäß einer speziellen Ausgestaltung des Verfahrens wird jeder Bildstreifen bei der Multiskalenzerlegung von Schritt a) in eine Laplace-Pyramide und eine Gauss-Pyramide mit jeweils K Stufen zerlegt. In der Stufe j einer Gauss-Pyramide ist dabei das Stufen-Eingangsbild das Ausgangsbild der vorangehenden Stufe ($j-1$), und das Ausgangsbild
- 5 (nachfolgend "Gauss-Pyramidenabbildung der Stufe j " genannt) das durch eine Tiefpassfilterung und anschließende Auflösungsreduktion modifizierte Stufen-Eingangsbild. Das Ausgangsbild der Laplace-Pyramide auf der Stufe j (nachfolgend "Laplace-Pyramidenabbildung der Stufe j " genannt) erhält man durch Subtraktion der in der Auflösung wieder erhöhten und anschließend tiefpassgefilterten Gauss-
- 10 Pyramidenabbildung derselben Stufe j von der Gauss-Pyramidenabbildung der vorangehenden Stufe ($j-1$). Die Zerlegung eines Eingangsbildes in eine Laplace-Pyramide beziehungsweise Gauss-Pyramide wird in der medizinischen Bildverarbeitung häufig angewendet und ist für die Ausführung an Bildstreifen besonders geeignet.
- 15 Vorzugsweise sind in den Schritten a) bis d) die einer Multiskalenzerlegung unterzogenen Bildstreifen jeweils 2^K Zeilen breit, wobei K die Anzahl der Zerlegungsstufen der Multiskalenzerlegung ist. Bildstreifen von der Breite 2^K haben die minimale Breite, die für eine Zerlegung in eine Laplace-Pyramide bzw. Gauss-Pyramide bis zur Stufe K erforderlich ist, wenn auf jeder Stufe der Zerlegung eine Reduktion der
- 20 Zeilen und Spalten um jeweils den Faktor 2 erfolgt. Das Detailbild der größten Stufe hat für einen derartigen Bildstreifen gerade die minimale Breite von einer Zeile. Ferner sind die Bildstreifen optional jeweils um (2^K-1) Zeilen gegeneinander versetzt oder mit anderen Worten jeweils um eine Zeile überlappend. Eine solche Überlappung, die vorzugsweise auch auf allen Zerlegungsstufen der Bildstreifen vorliegt, stellt für am
- 25 Rand des neuen, nicht überlappenden Bereiches stattfindende Filteroperationen die benötigten Informationen bereit. Je nach der Breite der verwendeten Filter können auch mehr als eine Zeile breite Überlappungen zwischen den Bildstreifen vorliegen.
- Die Art der mit den Detailbildern ausgeführten Modifikationen kann je nach
- 30 Anwendungsfall unterschiedlich sein. Vorzugsweise besteht die Modifikation eines

Detailbildes der Zerlegungsstufe $j < K$ in der Anwendung eines Filters, wobei die Koeffizienten dieses Filters von mindestens einem aus dem Bildstreifen berechneten Gradienten abhängen. Da Gradienten des Bildes die Lage von lokalen Strukturen im Bild widerspiegeln, können mit ihrer Hilfe anisotrope Filter definiert werden, deren Anwendung die Strukturen unverändert lässt oder sogar noch verstärkt und ein Rauschen entlang der Strukturen unterdrückt.

Vorzugsweise wird das vorstehende Verfahren mit einer Zerlegung in eine Gauss-Pyramide und eine Laplace-Pyramide kombiniert und der Gradient aus der Gauss-Pyramidenabbildung der Zerlegungsstufe j berechnet und zur Filterung der Laplace-Pyramidenabbildung derselben Stufe j verwendet. Dies hat den Vorteil, dass alle für die Modifikation benötigten Informationen aus den Daten der Zerlegungsstufe j gewonnen werden können, so dass die Modifikation unmittelbar bei der Berechnung dieser Stufe ausgeführt werden kann.

Gemäß einer speziellen Ausbildung der vorstehenden gradientenadaptiven Filterung von Detailbildern werden die Filterkoeffizienten $\alpha(\Delta\vec{x}, \vec{x})$ aus den Koeffizienten $\beta(\Delta\vec{x})$ eines vorgegebenen Filters wie zum Beispiel eines Binomial-Filters berechnet, wobei \vec{x} der durch den Filter bearbeitete Bildpunkt und $\Delta\vec{x}$ die Lage des jeweiligen Koeffizienten in Bezug auf das Zentrum des Filters ist, und wobei folgende Formel gilt:

$$\alpha(\Delta\vec{x}, \vec{x}) = \beta(\Delta\vec{x}) [r(\vec{g}(\vec{x}), \Delta\vec{x})]^2 \quad (1)$$

Hierin ist $\vec{g}(\vec{x})$ der Gradient an der Bildposition \vec{x} und $0 \leq r \leq 1$. Dort, wo die Gewichtungsfunktion $r(\vec{g}, \vec{x}) < 1$ ist, werden die entsprechenden Filterkoeffizienten β verkleinert und ihr Beitrag zum Filterergebnis verringert. Auf diese Weise wird ein Rauschbeitrag an den entsprechenden Lagen eines Bildes unterdrückt.

Die Gewichtungsfunktion r wird vorzugsweise wie folgt definiert:

$$r(\vec{g}, \Delta\vec{x}) = \left(\frac{1}{1 + c[\vec{g}](\vec{g} \cdot \Delta\vec{x})^2} \right) \quad (2)$$

- wobei $c[\vec{g}]$ ein Faktor ist, der vorzugsweise von dem Gradientenfeld \vec{g} und dessen
- 5 Varianz abhängt. Obige Definition des Faktors r hat die gewünschte Eigenschaft, dass $r = 1$ in Richtungen $\Delta\vec{x}$ senkrecht zum Gradienten $\vec{g}(\vec{x})$ ist, und dass r minimal ist in Richtungen $\Delta\vec{x}$ parallel zu $\vec{g}(\vec{x})$. Die Definitionen für die Berechnung von α und r sind hinsichtlich ihres Rechenaufwandes erheblich einfacher als die in der WO 98/55916 A1 angegebenen Definitionen, wobei die Ergebnisse näherungsweise identisch sind.

10

Die Erfindung betrifft ferner eine Datenverarbeitungseinheit zur Verarbeitung eines aus N Zeilen von Bildpunkten bestehenden digitalen Eingangsbildes, welche einen Systemspeicher sowie einen Cache-Speicher enthält. Die Datenverarbeitungseinheit ist dazu eingerichtet, die folgenden Verarbeitungsschritte auszuführen:

15

- a) Zerlegung eines aus $n < N$ benachbarten Zeilen des Eingangsbildes bestehenden Bildstreifens in eine Folge von K Detailbildern, die jeweils nur einen Teil der Ortsfrequenzen des Eingangsbildes enthalten;
- 20 b) Modifikation mindestens eines der Detailbilder;
- c) Rekonstruktion eines Ausgangsbildstreifens aus den - gegebenenfalls modifizierten - Detailbildern;
- 25 d) Wiederholung der Schritte a), b) und c) für andere Bildstreifen des Eingangsbildes;
- e) Rekonstruktion eines Ausgangsbildes aus den berechneten Ausgangsbildstreifen;

wobei sich während der Schritte a)-c) alle verarbeiteten Daten (Daten der Bildstreifen, Daten der zugehörigen Detailbilder der Multiskalenzerlegung der Bildstreifen) jeweils im Cache-Speicher befinden.

5

Mit einer derartigen Datenverarbeitungseinheit lässt sich das oben beschriebene Verfahren sehr effizient und schnell ausführen, da alle benötigten Daten im Cache-Speicher untergebracht werden können und somit ein schneller Zugriff hierauf möglich ist. Im Gegensatz hierzu wird bei einer herkömmlichen Multiskalenzerlegung jeweils

10

das komplette Bild analysiert, wodurch zur Speicherung der Zwischenergebnisse auf den Systemspeicher (Arbeitsspeicher, Festplatte etc.) zurückgegriffen werden muss. Ein Großteil der Rechenzeit wird somit für das Lesen und Schreiben der Daten aus dem Systemspeicher verbraucht. Durch den Wegfall dieser zeitaufwändigen Operationen ist es möglich, mit Hilfe obiger Datenverarbeitungseinheit die Bildverarbeitung auch in

15

Echtzeit durchzuführen.

Vorzugsweise ist die Datenverarbeitungseinheit mit Parallelprozessoren und/oder Vektorprozessoren ausgestattet. In diesem Falle können die erforderlichen Operationen durch eine Parallelisierung weiter beschleunigt werden.

20

Weiterhin ist die Datenverarbeitungseinheit vorzugsweise so ausgestaltet, dass sie auch die oben erläuterten Varianten des Verfahrens ausführen kann.

Die Erfindung betrifft ferner ein Röntgensystem enthaltend:

25

- eine Röntgenstrahlungsquelle;

- einen Röntgendetektor;

30

- eine mit dem Röntgendetektor gekoppelte Datenverarbeitungseinheit zur Verarbeitung der von dem Röntgendetektor erzeugten Röntgen-Eingangsbilder, wobei die Datenverarbeitungseinheit in der oben erläuterten Weise ausgestaltet ist.

Der Vorteil eines solchen Röntgensystems besteht darin, dass in Echtzeit z.B. während eines medizinischen Eingriffes eine leistungsfähige Bildverarbeitung ausgeführt werden kann, welche ohne Beeinträchtigung von interessierenden Strukturen eine Rausch-
5 unterdrückung vornimmt. Insbesondere kann in Echtzeit ein MRGAF Verfahren ausgeführt werden. Durch die informationserhaltende Rauschunterdrückung wird es möglich, Röntgenaufnahmen mit entsprechend geringerer Strahlendosis anzufertigen und somit die Strahlenbelastung für den Patienten und das Personal zu minimieren.

10 Im Folgenden wird die Erfindung mit Hilfe der Figuren beispielhaft erläutert. Es zeigt:

Fig. 1 das Ablaufschema eines MRGAF Algorithmus nach dem Stand der Technik;

15 Fig. 2 die Verwendung von Variablen bei der Tiefpassfilterung und Auflösungsreduktion während der Erzeugung einer Gauss-Pyramidenabbildung der nächst höheren Zerlegungsstufe;

Fig. 3 die Berechnung der Laplace-Pyramidenabbildung sowie der Gradientenfelder in x und y-Richtung aus zwei aufeinanderfolgenden Gauss-Pyramidenabbildungen;

20 Fig. 4 die Lage der Bildpunkte in verschiedenen Zerlegungsstufen;

Fig. 5 die Lage der Bildpunkte in verschiedenen Kompositionsstufen;

25 Fig. 6 das Ablaufschema eines erfindungsgemäßen MRGAF Algorithmus.

Der in Figur 1 schematisch dargestellte MRGAF Algorithmus wird in der EP 996 090 A2 und der WO 98/55916 A1 detailliert beschrieben und soll daher nachfolgend nur überblicksartig dargestellt werden. Ziel des MRGAF Algorithmus ist
30 die signifikante Reduzierung des Rauschens in einem Eingangsbild I bei gleichzeitiger Erhaltung der Bilddetails und der Bildschärfe. Die Grundidee des Algorithmus besteht in einer Multiskalenzerlegung und einer anisotropen Tiefpassfilterung der dabei

entstehenden Detailbilder in Abhängigkeit vom lokalen Bildgradienten.

Bei dem in Figur 1 dargestellten Beispiel findet eine Zerlegung des Eingangsbildes I , welches aus 512×512 Bildpunkten (Pixeln) besteht, in $K = 4$ Zerlegungsstufen statt.

- 5 Auf jeder Zerlegungsstufe $j = 0, 1, 2, 3$ wird als Detailbild eine sogenannte Laplace-Pyramidenabbildung Λ_j sowie eine Gauss-Pyramidenabbildung Γ_j erzeugt. Die Stufen-Eingangsabbildung ist jeweils die Gauss-Pyramidenabbildung Γ_{j-1} der vorangehenden Stufe ($j-1$) beziehungsweise die ursprüngliche Eingangsabbildung I . Die Gauss-Pyramidenabbildung Γ_j wird durch Anwendung einer Reduktionsoperation R auf die
- 10 jeweilige Stufen-Eingangsabbildung erzeugt, wobei eine "Reduktion" eine Tiefpassfilterung (Glättung) und anschließende Auflösungsreduktion (Unterabtastung) mit dem Faktor 2 bedeutet, was zu einem Bild der halben Größe führt. Die Laplace-Pyramidenabbildungen Λ_j sind definiert als die Differenz aus der Stufen-Eingangsabbildung und deren Kopie nach Durchlaufen der Blöcke Reduktion R und Expansion E . Die
- 15 "Expansion" E beinhaltet dabei eine Auflösungserhöhung mit dem Faktor 2 (durch Einfügen von Nullen) und eine anschließende Tiefpassfilterung (Interpolation). Für die Tiefpassfilterungen bei der Reduktion R und der Expansion E werden dabei 3×3 Binomial-Filter verwendet. Die Laplace-Pyramidenabbildungen Λ_j enthalten demnach den Hochpassanteil und die Gauss-Pyramidenabbildungen Γ_j den zugehörigen
- 20 Tiefpassanteil der Zerlegungsstufe j (vgl. B. Jähne, Digitale Bildverarbeitung, 5. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2002, Kap. 11.4, 5.3).

- Vorbereitend für die Gradientenfilterung werden weiterhin durch einfache Differenzbildung zwischen benachbarten Pixeln die Gradienten Δ aus den Laplace-Pyramidenabbildungen Λ_j berechnet. Die jeweilige Differenz gehört dabei allerdings zu einem Ort
- 25 in der Mitte zwischen den zur Differenzbildung herangezogenen Pixeln. Weiterhin wird der Gradient zwar auf der Zerlegungsstufe j berechnet, jedoch zur Filterung auf der vorangehenden, feineren Zerlegungsstufe ($j-1$) verwendet. Aus diesen Gründen müssen die Gradienten geeignet interpoliert werden. Schließlich wird das Ergebnis noch mit
 - 30 dem Faktor 2 dividiert, um die feinere Abtastung zu kompensieren. Da der Modulus des

Bandpassbildes maximale Werte nicht nur bei Diskontinuitäten im ursprünglichen Bild sondern auch in der Nähe hiervon annimmt, werden die Gradienten der größeren Zerlegungsstufen $j' > j$ im Block E expandiert und zum Gradienten der Zerlegungsstufe j addiert.

5

Mit Ausnahme der größten Zerlegungsstufe werden alle Laplace-Pyramidenabbildungen Λ_0 bis Λ_2 in mit einem Filter GAF gefiltert, welcher adaptiv auf die wie beschrieben berechneten Gradienten reagiert. Der Ausgangspunkt der Filtersynthese ist dabei ein 3×3 Binomial-Filter, dessen Filterkoeffizienten $\beta(\Delta\vec{x})$ entlang der

10 Hauptrichtungen der Abbildungsstrukturen erhalten bleiben, während die Koeffizienten in Richtung der Gradienten zu diesen Strukturen verkleinert werden gemäß der folgenden Formel:

$$\alpha(\Delta\vec{x}, \vec{x}) = \beta(\Delta\vec{x}) r(\vec{g}(\vec{x}), \Delta\vec{x}) r(\vec{g}(\vec{x} + \Delta\vec{x}), \Delta\vec{x}) \quad (3)$$

15

wobei $\alpha(\Delta\vec{x}, \vec{x})$ der neue Koeffizient des Filters, \vec{x} die zu filternde Bildposition, $\Delta\vec{x}$ der vom Zentrum des Filterkerns zum betrachteten Koeffizienten weisende Vektor, $\beta(\Delta\vec{x})$ der ursprüngliche Filterkoeffizient, r eine Gewichtungsfunktion und $\vec{g}(\vec{x})$ der Gradient am Bildpunkt \vec{x} ist. Die Gewichtungsfunktion r fällt exponentiell mit dem

20 Skalarprodukt des Gradienten und der Koeffizientenrichtung $\Delta\vec{x}$ gemäß

$$r(\vec{g}, \Delta\vec{x}) = \exp\left(-\frac{(\vec{g} \cdot \Delta\vec{x})^2}{c + t \cdot \text{Var}(\vec{g}) + L \|\vec{g}\|^2}\right) \quad (4)$$

25 wobei c , t und L vom Benutzer definierbare Parameter und $\text{Var}(\vec{g}(\vec{x}))$ die geschätzte Varianz des Rauschens des Gradientenfeldes ist.

Wie aus Figur 1 hervorgeht, setzt die Berechnung der gradientenadaptiven Filter GAF die bereits verarbeitete und rekonstruierte Gauss-Pyramide mit den Abbildungen Γ_j

voraus.

Der rechte Teil des Schemas von Figur 1 spiegelt die Synthese eines Ausgangsbildes A aus den (mit einer Filterung GAF modifizierten oder nicht modifizierten) Detailbildern

- 5 Λ_j durch sukzessive Addition und Expansion E wider. Falls keine Filterung der Detailbilder stattgefunden hätte, wäre das Ausgangsbild A identisch zum Eingangsbild I .

- Nachteilig bei dem beschriebenen MRGAF Algorithmus ist, dass dieser wegen des
10 hohen Rechenaufwandes bisher nur offline an gespeicherten Bildern beziehungsweise Bildsequenzen ausgeführt werden kann. Aufgrund der mit diesem Algorithmus erzielbaren signifikanten Bildverbesserung wäre es jedoch wünschenswert, ihn auch in Echtzeit zum Beispiel während einer laufenden medizinischen Untersuchung durchführen zu können. Dieses Ziel wird in der nachfolgend beschriebenen Weise durch
15 verschiedene Optimierungen, insbesondere aber durch einen Ansatz zur Verarbeitung sogenannter "Super-Zeilen" erreicht. Dieses Verarbeitungsprinzip ist dabei nicht nur im Falle des beispielhaft betrachteten MRGAF Algorithmus anwendbar, sondern im Prinzip bei allen Multiskalenzerlegungen sowie bei anderen vergleichbaren Algorithmen wie etwa einem "sub-band coding".

20

- Der oben beschriebene ursprüngliche MRGAF Algorithmus verarbeitet die Daten Ebene für Ebene. Zuerst wird dabei das Eingangsbild I tiefpassgefiltert. Da die Bilder typischerweise zu groß sind, um in einen (Puffer-)Speicher mit schnellem Zugriff des Prozessors ("Cache") zu passen, muss ein Teil der Eingangsdaten und ein Teil der
25 verarbeiteten Daten aus dem Haupt- oder Systemspeicher (Arbeitsspeicher RAM und/oder Massenspeicher wie z.B. Festplatte) gelesen beziehungsweise dorthin geschrieben werden. Dies ist jedoch aus zwei Gründen nachteilig: Zum einen sind die Zugriffe auf den Systemspeicher verhältnismäßig langsam, zum anderen nimmt Speicher-Hardware hinsichtlich der Geschwindigkeitssteigerung weniger am
30 technologischen Fortschritt teil als datenverarbeitende Hardware. Es wurde daher

versucht, den MRGAF Algorithmus so zu verändern, dass der Anteil der Speicherzugriffe vermindert wird.

- Zur Verminderung der Schreib-/Leseoperationen auf dem Systemspeicher werden die
- 5 Berechnungen der Gauss-Pyramidenabbildungen und der Laplace-Pyramidenabbildungen sowie der Gradientenfelder auf jeder Zerlegungsstufe j miteinander kombiniert, so dass diese Werte in einem einzigen Durchgang über das Stufen-Eingangsbild lokal berechnet werden. Zu diesem Zweck muss zunächst der
- 10 tiefpassgefilterte und auflösungsreduzierte Wert der nächst größeren Gauss-Pyramidenabbildung Γ_{j+1} berechnet werden. Der schnellste Weg, dies zu erreichen, ist in Figur 2 schematisch dargestellt. Anstelle der Verwendung eines 3×3 Binomial-Tiefpassfilters $(1,2,1; 2,4,2; 1,2,1) \cdot 1/16$ können Multiplikationen und Additionen eingespart werden durch Anwendung des eindimensionalen Tiefpassfilters $(1,2,1) \cdot 1/4$ nacheinander in x- und y-Richtung (das heißt Zeilen- und Spaltenrichtung) und durch
- 15 Pufferung der Zwischenwerte b_i . Im Einzelnen verläuft der in Figur 2 dargestellte Algorithmus zur Berechnung eines Wertes aus Γ_{j+1} (Punkt in Figur 2) wie folgt:

Es sei

20

$$\begin{array}{ccc} x_{0,0} & x_{0,1} & x_{0,2} \\ x_{1,0} & x_{1,1} & x_{1,2} \\ x_{2,0} & x_{2,1} & x_{2,2} \end{array}$$

eine 3×3 Nachbarschaft um die aktuelle Position $x_{1,1}$ und

25

$$b_1 = x_{0,0} + x_{0,1} + x_{0,2} + x_{1,1}$$

ein aus der vorhergehenden Zeile zwischengespeicherter Wert.

30 Dann werden folgende Schritte ausgeführt, wobei v_1, v_2 temporäre Variable und b_0, b_1, b_2, \dots Puffervariable sind:

1. $v_1 = x_{1,0} + x_{1,1} + x_{1,1} + x_{1,2}$
2. $v_2 = x_{2,0} + x_{2,1} + x_{2,1} + x_{2,2}$
3. Ergebnis = $1/16 * (b_1 + v_1 + v_1 + v_2) \rightarrow$ in Γ_{j+1} eintragen
- 35 4. $b_1 = v_2$
(usw.)

Weiterhin wird gemäß Figur 3 der resultierende Wert der Gauss-Pyramidenabbildung Γ_{j+1} unmittelbar zur Berechnung von jeweils vier Werten in der Laplace-Pyramidenabbildung Λ_j und in den Gradientenfeldern Δ_x in x-Richtung beziehungsweise Δ_y in y-Richtung verwendet (vgl. markierte Punkte in Figur 3). Die Laplace-Werte ergeben sich dabei aus der Subtraktion

- des aktuellen Wertes der Gauss-Pyramidenabbildung Γ_{j+1} sowie der hiermit interpolierten Werte in Bezug auf die bereits berechneten Nachbarn in Γ_{j+1} links und oberhalb der aktuellen Position
- von den korrespondierenden Werten der Gauss-Pyramidenabbildung Γ_j .

Die Gradientenwerte sind die Differenz zu den bereits berechneten Werten der Gauss-Pyramidenabbildung Γ_{j+1} links und oberhalb der aktuellen Position (kurze Striche in Figur 3) sowie die interpolierten Werte unter Verwendung der bereits berechneten Werte in den Gradientenfeldern. Aufgrund der gleichzeitig durchgeführten Auflösungserhöhung ist es möglich, die berechneten Differenzen an die korrekten "Zwischenpositionen" zu setzen.

Mit der beschriebenen speicheroptimierten Berechnung der für die GAF Routine benötigten Daten kann der MRGAF Algorithmus bereits um 15% schneller ausgeführt werden. Eine weitere wesentliche Steigerung der Effizienz ergibt sich indes durch die Neuerung, dass die gesamte Zerlegung mit der kleinstmöglichen Datenmenge ausgeführt wird, so dass die dabei benötigten Daten in einem Speicher mit schnellem Zugriff (Cache) gepuffert werden können. In diesem Falle sind die Schreib-/Leseoperationen für das Eingangsbild und das Ausgangsbild die einzigen noch erforderlichen Zugriffe auf den langsameren Systemspeicher.

Da ein Schreib-/Lesebefehl an eine Speicheradresse immer zum Schreiben/Lesen des gesamten nachfolgenden Datenblockes aus beziehungsweise in den Cache führt, wird

- die Verarbeitung kompletter Zeilen beibehalten. Es wird jedoch nicht das gesamte Eingangsbild I in einem Zug verarbeitet, sondern nur so wenig Zeilen wie möglich. Dies bedeutet, dass wie in Figur 4 dargestellt die Gauss-Pyramidenabbildung Γ_3 der größten Zerlegungsstufe nur aus einer einzigen Zeile zusammen mit der vorangehenden Zeile, welche zur Interpolation und Differenzberechnung erforderlich ist, besteht. Es muss daher aufgrund der Pyramidenstruktur eine "Super-Zeile" aus 2^K Zeilen gleichzeitig verarbeitet werden, wobei K die maximale Zerlegungsstufe ist (z.B. $K = 3$ in den Figuren 4, 5).
- Figur 3 kann als Darstellung der Berechnung des Laplace-Pyramidenblocks und der Gradientenblöcke auf der größten Zerlegungsstufe betrachtet werden. Die Blöcke bestehen aus zwei Zeilen plus einer zusätzlichen vorangehenden Zeile für die Interpolation. Wie aus Figur 3 erkennbar ist, findet eine Verschiebung aufgrund der Reduktion, der Re-Expansion und der Interpolation statt. Wenn die relativen Zeilen 0 und 1 als Eingabe gegeben werden, kann die gradientenadaptive Filterung GAF nur auf den Zeilen -1 und -2 des Laplace-Pyramidenblocks ausgeführt werden. Der Grund hierfür besteht in der Position der resultierenden Daten des y-Gradienten sowie in der Tatsache, dass die Filterung mit einem 3×3 GAF Filterkern ein Pixel zusätzlicher Daten an jeder Seite der Filterposition erfordert. Diese zusätzlichen Daten sind die Zeilen 0 und -3 (in Figur 3 nicht dargestellt) sowie die erste und letzte Spalte des Laplace-Pyramidenblocks.

In Figur 4 ist dargestellt, wie der Verschiebungseffekt sich auf den übrigen Zerlegungsstufen verhält. Dabei ist erkennbar, dass die gefilterte Fläche (dunkelgrau) immer zwei Zeilen über der aktuellen Position und der Laplace-Pyramidenblock Λ_j (hellgrau) eine Zeile über der aktuellen Position liegt, wobei Letzterer an der Oberseite durch zwei vorangehende Zeilen erweitert ist, um ein 3×3 Filtern zu ermöglichen.

Im letzten Schritt des Verfahrens wird der Bildblock aus den gefilterten Laplace-Pyramidenabbildungen rekonstruiert. Wie in Figur 5 dargestellt ist, summiert sich die Verschiebung der gefilterten Daten um zwei Zeilen während der Syntheseschritte auf,

was in einer verhältnismäßig großen Verschiebung des rekonstruierten Bildblockes resultiert. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die Daten an falsche Stellen zurückgeschrieben würden; alle Werte gelangen dorthin, wo sie herkamen. In Wirklichkeit handelt es sich nicht um eine Verschiebung im Ort, sondern in der Zeit

5 aufgrund der Kausalitätsbedingung, dass nur mit bereits berechneten Werten interpoliert werden kann. Die hellgrauen Bereiche in Figur 5 kennzeichnen dabei zuvor gefilterte Daten, die bis zur Synthese vorgehalten werden müssen. Diesbezüglich kann jedoch eine erhebliche Menge an Pufferdaten eingespart werden, indem einfach die Schritte der Filterung und der Synthese vertauscht werden: Zunächst werden die einzigen drei

10 Zeilen, die noch für die Synthese benötigt werden, gefiltert (zwei Zeilen aus der Zerlegungsstufe 2 und eine Zeile aus der Stufe 1 - dunkelgrau in Figur 5). Anschließend wird die Synthese ausgeführt, so dass die Daten in den Rekonstruktionspuffern mit den verbleibenden Filterwerten (dunkelgrau) überschrieben werden können. Als Ergebnis dieses Austausches muss der Rekonstruktionspuffer der Stufe 0 zum Beispiel nicht neun

15 zusätzliche vorangehende Zeilen, sondern nur eine bereithalten. Diese Zahl wäre 3, 5, 7, ... falls mehr Zerlegungsstufen verwendet würden.

Die folgende Berechnung schätzt den gesamten Speicherbedarf zur Pufferung von Daten bei obigem Verfahren ab. Dabei wird angenommen, dass die Bildbreite 512 Pixel

20 beträgt, eine dreistufige Pyramide verwendet wird, sowie 4 Byte Gleitkommawerte für alle Rechnungen verwendet werden.

Gauss-Pyramide:	$4 * [512 * 8 + 256 * (4+1) + 128 * (2+1) + 64 * (1+1)]$	= 23 552 Byte
Laplace-Pyramide:	$4 * [512 * (8+2) + 256 * (4+2) + 128 * (2+2)]$	= 28 672 Byte
25 Gradientenfelder:	$2 * 4 * [512 * (8+1) + 256 * (4+1) + 128 * (2+1)]$	= 50 176 Byte
Synthesepuffer:	$4 * [512 * (8+1+1) + 256 * (4+1) + 128 * (2+1)]$	= 27 136 Byte

		• 129 536 Byte

30 Die Berechnung zeigt, dass alle Berechnungen mit Daten im Second-Level-Cache durchgeführt werden können, wenn dieser eine typische Größe von 256 kB = 262 144 Byte hat. Es verbleibt sogar noch Platz für weitere 19 Zeilen des ursprünglichen Bildes, falls das Ergebnis hierin zurückgeschrieben werden soll:

$$4 \cdot 19 \cdot 512 = 38912 \text{ Byte}$$

Für einen Vergleich der vorgestellten Verfahren kann die ursprüngliche Version des
5 MRGAF Algorithmus wie folgt skizziert werden:

Für alle Ebenen der Pyramide:

1. Reduktion des Stufen-Eingangsbildes in x-Richtung → Puffer
2. Reduktion des Puffers in y-Richtung → Gauss-Pyramidenabbildung
- 10 3. Expansion der Gauss-Pyramidenabbildung in y-Richtung → Puffer
4. Expansion des Puffers in x-Richtung → zweiter Puffer
5. Subtraktion des zweiten Puffers vom Stufen-Eingangsbild
→ Laplace-Pyramidenabbildung

- 15 Im Gegensatz hierzu findet beim neuen Algorithmus alles mit Daten aus dem Second-Level-Cache während eines nur einmaligen Durchlaufens des Bildes statt. Die Pyramidenzerlegung, die Gradientenberechnung, die adaptive Filterung und die Bildsynthese werden auf Bildstreifen ausgeführt, die so schmal wie möglich sind.
- 20 Die Größe der temporären Pufferspeicher wird aus der Forderung abgeleitet, dass die größte Stufe der Gauss-Pyramide nur aus einer Zeile zusammen mit der vorangehenden Zeile für die Interpolation besteht. Die Situation wird dadurch verkompliziert, dass aufgrund aller Re-Expansionen mit Interpolationen, die nur unter Verwendung von bereits verarbeiteten Zeilen möglich sind, die Filterung nicht weiter als bis zwei Zeilen
- 25 oberhalb der unteren Grenze des gelesenen Bildblockes ausgeführt werden kann (vgl. Figur 4: die y-Gradienten können für die letzten zwei Zeilen nicht berechnet werden). Für die größte Stufe der Laplace-Pyramide mit einer Höhe von zwei Pixeln bedeutet dies, dass es nur möglich ist, den vorangehenden Block zu filtern. Während der Rekonstruktion wächst diese Verschiebung von Stufe zu Stufe. Dies bedeutet, dass eine
- 30 große Datenmenge (mindestens eine Blockgröße) bereitgehalten und in den Puffern bei jedem Schritt verschoben werden müsste. Durch die Vertauschung der "Filterung" und der "Rekonstruktion" kann die Anzahl der Kopieroperationen jedoch glücklicherweise

reduziert werden. In Figur 6 ist der Algorithmus schematisch dargestellt, welcher die folgenden Schritte umfasst:

- 5 Für alle Bildstreifen der
Größe $2^{(\text{Anzahl der Zerlegungsstufen})} \times (\text{Bildbreite})$:
 1. Für alle Zerlegungsstufen:
 - 10 Durchlaufe den Stufen-Bildstreifen in x- und y-Richtung in 2er
Schritten, wobei an jeder Position folgendes vorgenommen wird:
 - Tiefpassfilterung in x- und y-Richtung → ein Pixel der
Gauss-Pyramidenabbildung
 - 15 - Expansion des geschriebenen Pixels zurück auf vier Pixel
(unter Verwendung seiner Nachbarn zur Interpolation) und
deren direkte Subtraktion von den Pixeln der Stufen-
Eingangsabbildung → 4 Pixel der Laplace-Pyramidenabbildung
 - 20 - Berechnung der Differenz zwischen dem berechneten Pixel
der Gauss-Pyramidenabbildung und seinen Nachbarn,
Interpolation der Ergebnisse mit zuvor berechneten
Gradienten → 4 Pixel in den x- und y-Gradientenfeldern
 - 25
 2. Filtern der letzten zwei Zeilen der größten Stufe der Laplace-
Pyramide und der ersten Zeile aus der zweitgrößten Stufe (diese
Zeilen werden noch für die Rekonstruktion benötigt, die anderen sind
bereits verfügbar) → Rekonstruktionspuffer
 - 30
 3. Rekonstruktion eines Bildstreifens aus dem Rekonstruktions-
Pyramidenpuffer
 4. Für alle Stufen außer der größten:
 - 35 - Kopieren der im nächsten Schritt erforderlichen Daten von
unten nach oben in dem Rekonstruktionspuffer
 - Filtern der aktuellen Laplace-Pyramidenstreifen →
40 Rekonstruktionspuffer.

Im Folgenden werden eine Reihe von Verfeinerungen des Algorithmus beschrieben, welche zu einer weiteren Beschleunigung beitragen.

Aus einem Vergleich von Figur 1 mit Figur 6, welche den erfindungsgemäßen MRGAF Algorithmus darstellt, ist als wichtiger Unterschied erkennbar, dass bei dem neuen Algorithmus die Gradientenfelder auf jeder Stufe unmittelbar aus den tiefpassgefilterten Stufen-Eingangsabbildungen berechnet werden. Da der Algorithmus nicht mehr darauf
5 warten muss, dass die nächst gröbere Pyramidenstufe gefiltert wird, wird die Filterung nunmehr auf allen Zerlegungsebenen parallel ausgeführt.

- Gemäß Gleichung (4) wird bei dem ursprünglichen MRGAF Algorithmus für jeden Filterkoeffizienten an jeder Filterposition und auf jeder Zerlegungsstufe eine
10 Exponentialfunktion berechnet. Diesbezüglich wird vorgeschlagen, die Funktion $\exp(-x)$ durch die Näherung $1/(1+x)$ zu ersetzen, welche einen ähnlichen Verlauf bei erheblich geringerem Rechenaufwand bereitstellt. Auf diese Weise gelangt man zu Gleichung (2) für die neuen Filterkoeffizienten.
- 15 Im ursprünglichen MRGAF Algorithmus wird gemäß Gleichung (3) jeder Filterkoeffizient mit zwei Faktoren r gewichtet, von denen einer mit den Gradienten an der aktuellen Bildposition \vec{x} und der andere mit den Gradienten an der Koeffizientenposition $\vec{x} + \Delta\vec{x}$ berechnet wird. Bei einem 3×3 Filterkern müssen daher für jedes gefilterte Pixel neun verschiedene Gradientenfaktoren berechnet werden. Durch die
20 Gradientenberechnung an allen Filterposition soll die Behandlung von gekrümmten Linien verbessert werden. Bei Verwendung von 3×3 Filtern erweist sich dieses Vorgehen jedoch als unnötig, da aus der gröberen Pyramidenstufe interpolierte benachbarte Gradienten einander sehr ähnlich sind. Anstelle von Gleichung (3) wird daher die vereinfachte Formel gemäß Gleichung (1) vorgeschlagen. Die Berechnung der
25 Filterroutine vereinfacht sich hierdurch erheblich, da gegenüberliegende Filterkoeffizienten nunmehr denselben Wert haben und nur ein statt neun Zähler von Gleichung (2) berechnet werden müssen.

Die Varianz des Rauschens des Gradientenfeldes im Nenner von Gleichung (2),
30 $Var(\vec{g}(\vec{x}))$, wird näherungsweise ersetzt durch die Varianz des Rauschens des

entsprechenden Pixels der gröberen Pyramidenstufe. Die Qualität des Filterergebnisses wird hierdurch nicht beeinträchtigt.

- 5 Aus Figur 6 ist ersichtlich, dass bei der Verwendung der Gauss-Pyramidenabbildungen zur Gradientenberechnung die gröbste Pyramidenstufe (mit Γ_3 , Λ_3) überflüssig wird. Auf die Berechnung dieser Stufe kann daher verzichtet werden. Eine Dreistufenfilterung führt somit zu demselben Ergebnis wie zuvor eine Vierstufenfilterung.

- 10 Die Implementation eines Programms unter Berücksichtigung der oben diskutierten Vereinfachungen führte auf einem dualen Xeon Pentium 4 mit 1.7 GHz und bei Übersetzung mit einem Intel C++ Compiler im günstigsten Fall zu einer Laufzeit von 0.0229 sec für ein Bild, was 43.6 Bildern (512×512) pro Sekunde entspricht (dto. über dreißig (768×564) Bilder/s). Das Verfahren hat damit einen Stand erreicht, der es für Echtzeitanwendungen geeignet macht.

PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zur Verarbeitung eines aus N Zeilen von Bildpunkten bestehenden Eingangsbildes (I), wobei
 - a) ein aus $n < N$ benachbarten Zeilen des Eingangsbildes bestehender Bildstreifen
5 in eine Folge von K Detailbildern ($\Lambda_0, \dots \Lambda_3; \Gamma_0, \dots \Gamma_3$), die jeweils nur einen Teil der Ortsfrequenzen des Eingangsbildes enthalten, zerlegt wird;
 - b) mindestens eines der Detailbilder ($\Lambda_0, \dots \Lambda_2$) modifiziert wird;
 - c) ein Ausgangsbildstreifen aus den - gegebenenfalls modifizierten - Detailbildern rekonstruiert wird;
 - 10 d) die Schritte a), b) und c) für andere Bildstreifen des Eingangsbildes wiederholt werden;
 - e) ein Ausgangsbild (A) aus den berechneten Ausgangsbildstreifen rekonstruiert wird.
- 15 2. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
dass jeder Bildstreifen in eine Laplace-Pyramide und in eine Gauss-Pyramide mit K Stufen zerlegt wird.
- 20 3. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Bildstreifen jeweils eine Breite von 2^K Zeilen haben.

4. Verfahren nach Anspruch 1,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Modifikation eines Detailbildes (Λ_j) der Zerlegungsstufe $j < K$ durch Anwendung eines Filters (GAF) erfolgt, dessen Koeffizienten von mindestens einem
5 aus dem Bildstreifen berechneten Gradienten abhängen.

5. Verfahren nach Anspruch 2 und 4,

dadurch gekennzeichnet,

dass der Gradient aus der Gauss-Pyramidenabbildung (Γ_j) der j-ten Zerlegungsstufe
10 berechnet wird.

6. Verfahren nach Anspruch 4,

dadurch gekennzeichnet,

dass die Filterkoeffizienten $\alpha(\Delta\vec{x}, \vec{x})$ aus den Koeffizienten $\beta(\Delta\vec{x})$ eines vorgegebenen
15 Filters berechnet werden gemäß der Formel

$$\alpha(\Delta\vec{x}, \vec{x}) = \beta(\Delta\vec{x}) [r(\vec{g}(\vec{x}), \Delta\vec{x})]^2,$$

wobei \vec{x} der durch die Filteroperation bearbeiteten Bildpunkt, $\Delta\vec{x}$ die Lage des

20 Koeffizienten relativ zum Zentrum des Filters, $\vec{g}(\vec{x})$ der Gradient an der Bildposition \vec{x} und $0 \leq r \leq 1$ ist.

7. Verfahren nach Anspruch 6,
dadurch gekennzeichnet,
 dass

$$5 \quad r(\vec{g}, \Delta \vec{x}) = \left(\frac{1}{1 + c[\vec{g}](\vec{g} \cdot \Delta \vec{x})^2} \right),$$

wobei $c[\vec{g}]$ ein vorzugsweise von dem Gradientenfeld und seiner Varianz abhängiger positiver Faktor ist.

- 10 8. Datenverarbeitungseinheit zur Verarbeitung eines aus N Zeilen von Bildpunkten bestehenden digitalen Eingangsbildes (I), welche einen Systemspeicher sowie einen Cache-Speicher enthält und dazu eingerichtet ist, die folgenden Verarbeitungsschritte auszuführen:
- a) Zerlegung eines aus $n < N$ benachbarten Zeilen des Eingangsbildes bestehenden Bildstreifens in eine Folge von K Detailbildern ($\Lambda_0, \dots, \Lambda_3; \Gamma_0, \dots, \Gamma_3$), die jeweils
 15 nur einen Teil der Ortsfrequenzen des Eingangsbildes enthalten;
 - b) Modifikation mindestens eines der Detailbilder ($\Lambda_0, \dots, \Lambda_2$);
 - c) Rekonstruktion eines Ausgangsbildstreifens aus den - gegebenenfalls modifizierten - Detailbildern;
 - 20 d) Wiederholung der Schritte a), b) und c) für andere Bildstreifen des Eingangsbildes;
 - e) Rekonstruktion eines Ausgangsbildes (A) aus den berechneten Ausgangsbildstreifen;
- wobei sich während der Schritte a)-c) alle verarbeiteten Daten jeweils im Cache-
 25 Speicher befinden.

9. Datenverarbeitungseinheit nach Anspruch 8,

dadurch gekennzeichnet,

dass sie Parallelprozessoren und/oder Vektorprozessoren enthält.

5

10. Röntgensystem, enthaltend

- eine Röntgenstrahlungsquelle;
- einen Röntgendetektor;
- eine mit dem Röntgendetektor gekoppelte Datenverarbeitungseinheit nach

10 Anspruch 8 oder 9 zur Verarbeitung der von dem Röntgendetektor übermittelten
Röntgen-Eingangsbilder.

ZUSAMMENFASSUNG

Verfahren zur Verarbeitung eines Eingangsbildes durch Multiskalenzerlegung

- Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Multiskalenzerlegung mit gradientenadaptiver Filterung (MRGAF) von Röntgenbildern in Echtzeit. Dabei wird für einen Bildstreifen
- 5 aus 2^K benachbarten Zeilen eine Zerlegung in eine Laplace-Pyramide ($\Lambda_0, \dots, \Lambda_3$) und eine Gauss-Pyramide ($\Gamma_0, \dots, \Gamma_3$) bis zur K-ten Stufe vorgenommen. Durch die Begrenzung eines Verarbeitungsdurchganges auf einen derartigen Streifen ist es möglich, alle dabei betroffenen Daten in einem lokalen Speicher mit schnellem Zugriff (Cache) bereit zu halten. Eine weitere Beschleunigung gegenüber dem üblichen
- 10 Algorithmus erfolgt durch die Berechnung der Gradienten (Δ) aus den Gauss-Pyramidenabbildungen. Durch diese und weitere Optimierungsmaßnahmen ist es möglich, eine Multiskalenzerlegung mit gradientenadaptiver Filterung bis zu einer Verarbeitungsrate von über dreißig (768×564)-Bildern pro Sekunde zu steigern.

15 Fig. 6

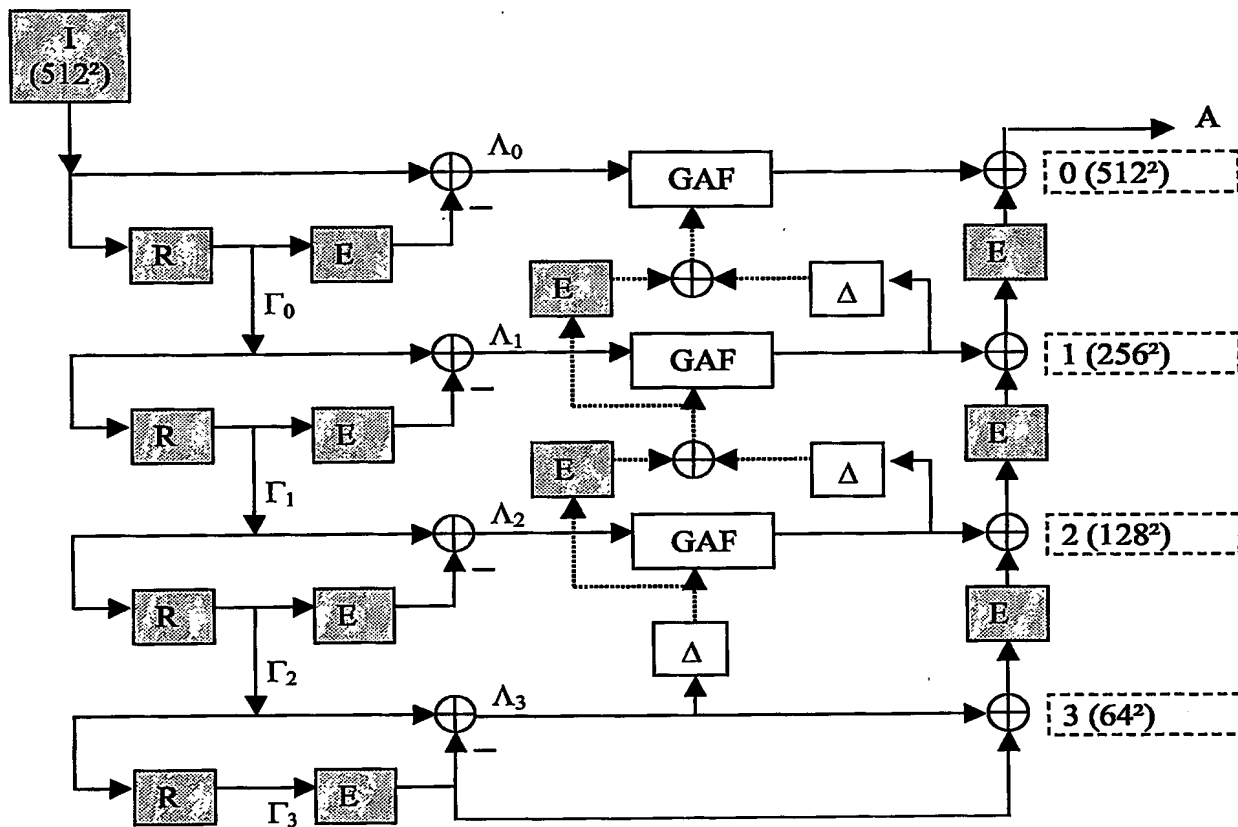


Fig. 1

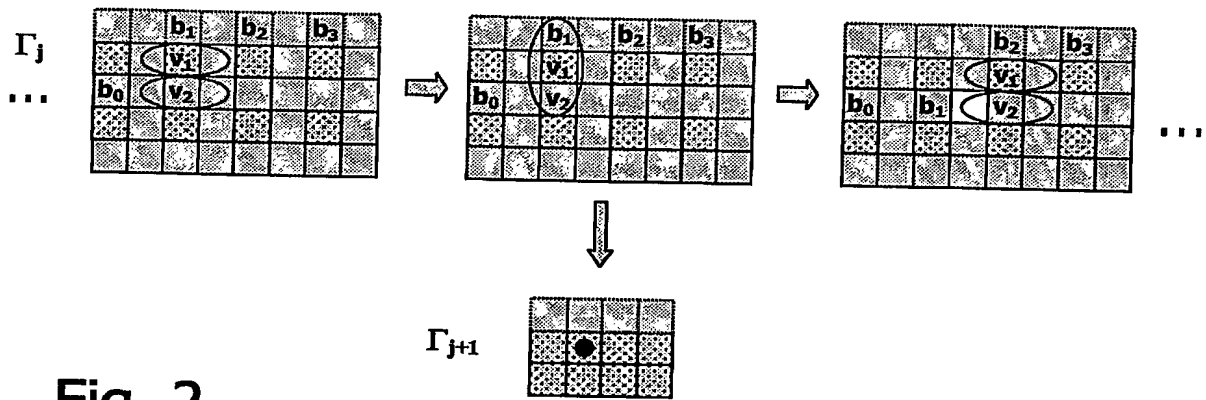


Fig. 2

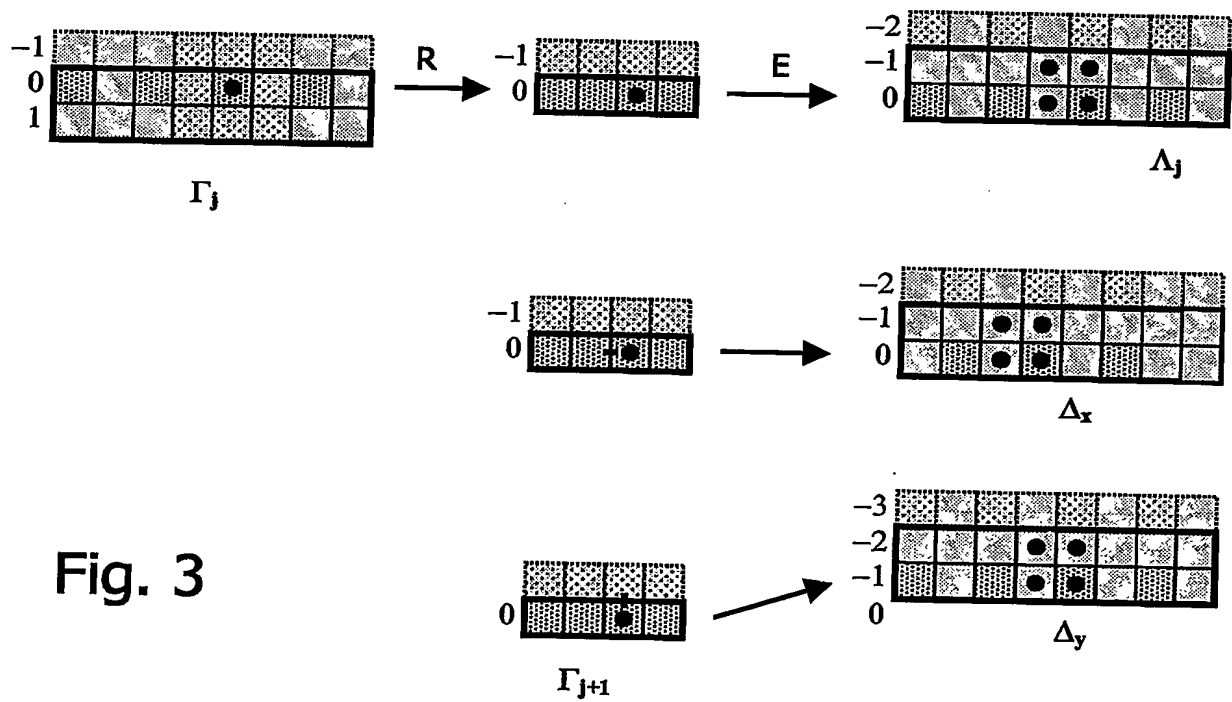


Fig. 3

3/4

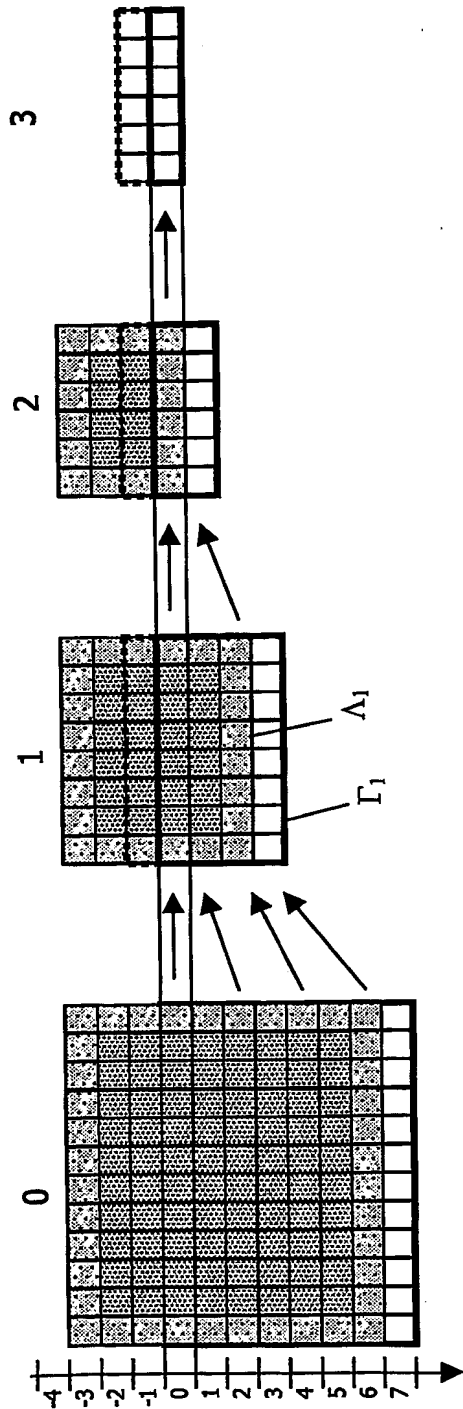


Fig. 4

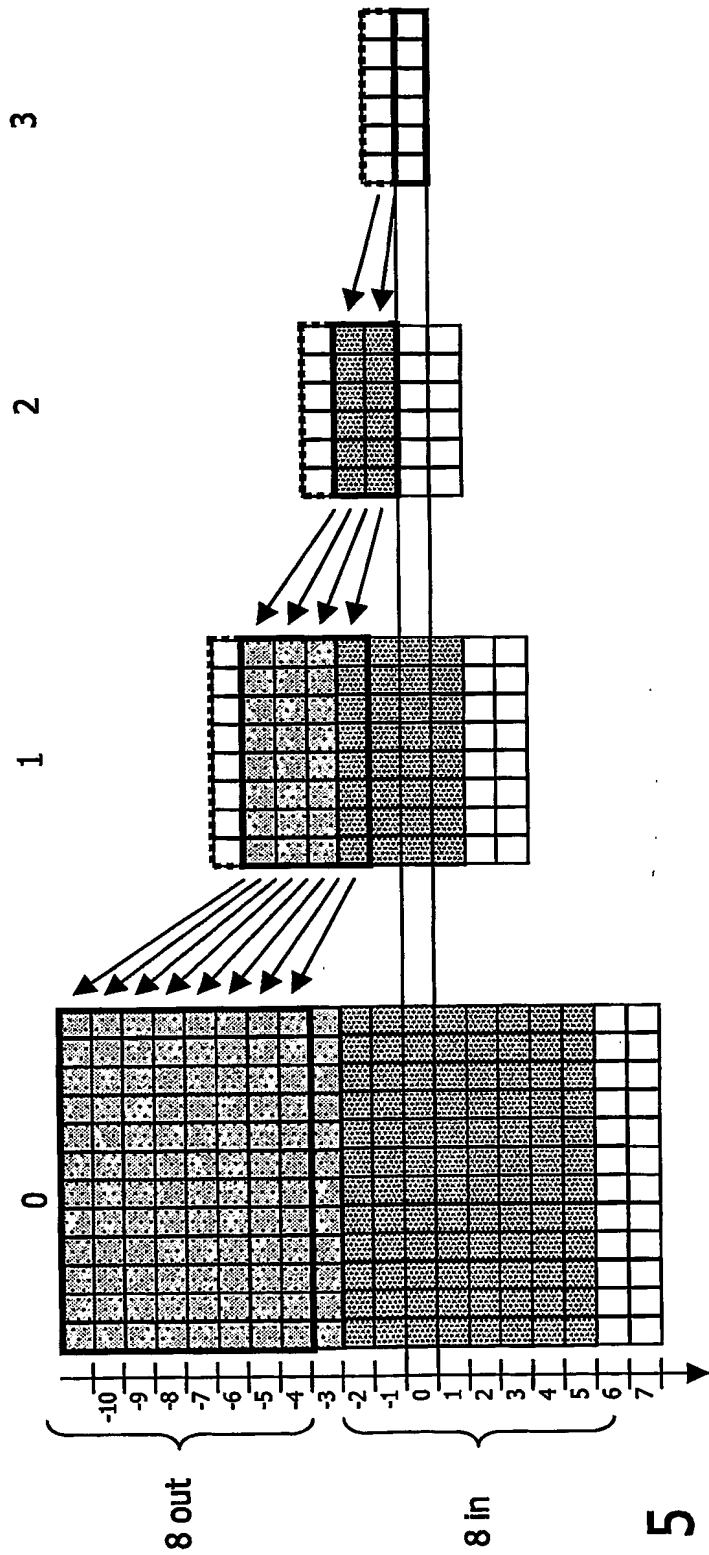


Fig. 5

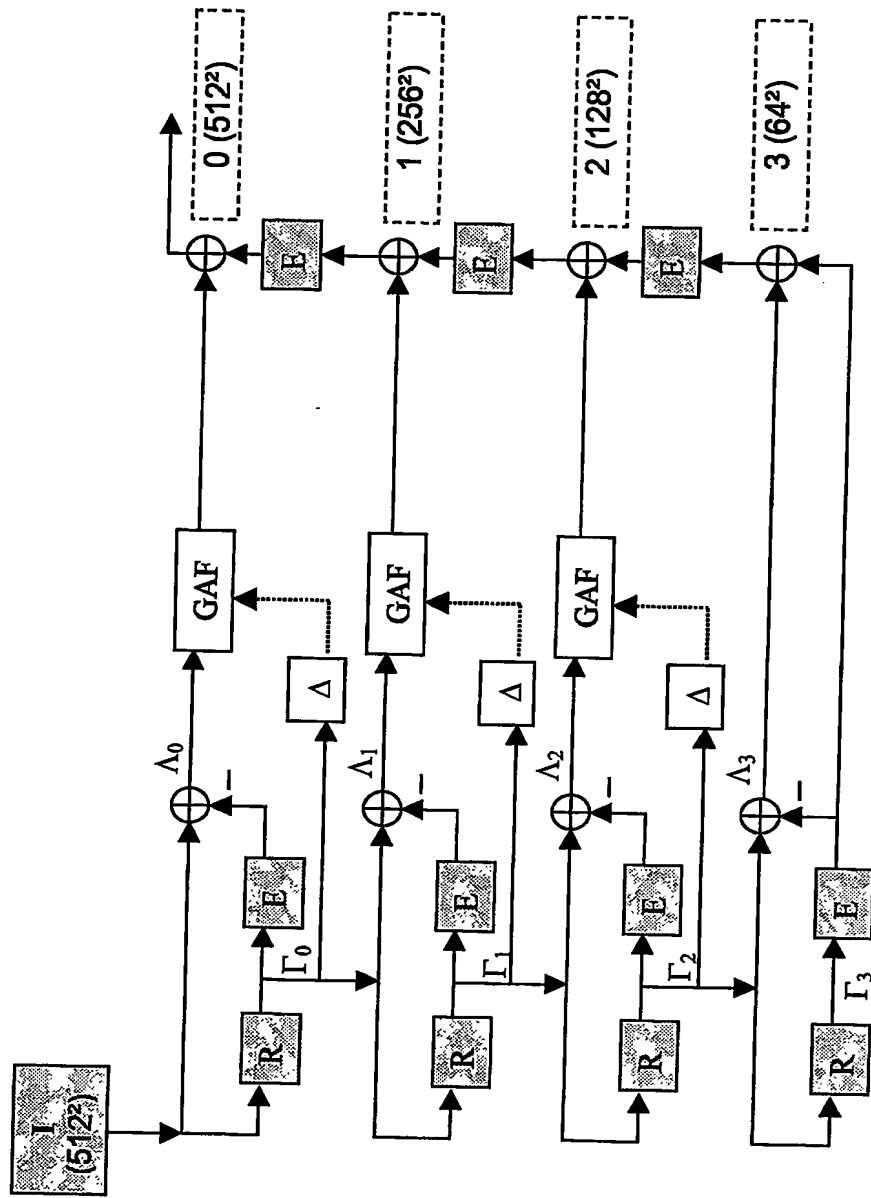


Fig. 6

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:



BLACK BORDERS



IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES



FADED TEXT OR DRAWING



BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING



SKEWED/SLANTED IMAGES



COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS



GRAY SCALE DOCUMENTS



LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT



REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY



OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.